

## Возможности микромагнитного расчета для интерпретации магнитных состояний ферромагнитных структур

Л.А. Фомин, Г.М Михайлов

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, 142432, Черноголовка, Россия  
fomin@iptm.ru*

Использование МСМ и микромагнитных расчетов позволило выявить типы магнитного строения эпитаксиальных ферромагнитных структур и предсказывать их в зависимости от размеров, формы и ориентации относительно кристаллографических осей.

### Abilities of micromagnetic calculations for interpretation of magnetic states in ferromagnetic structures

L.A. Fomin, G.M Mikhailov

*Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS, 142432, Chernogolovka, Russia*

The use of MFM and micromagnetic calculations made it possible to identify the types of the magnetic structure of epitaxial ferromagnetic structures and to predict them depending on their size, shape, and orientation with respect to the crystallographic axes.

Микро- и наноструктуры из ферромагнитных металлов широко используются в спинтронике. Для исследования магнитного строения микро- и наноструктур наиболее широко используемым является метод магнитно-силовой микроскопии (МСМ). Однако, интерпретация МСМ изображений не всегда однозначна, и часто для расшифровки магнитного строения используются микромагнитные расчеты. С другой стороны, результат расчета сильно зависит от начальных условий, и спрогнозировать, какое магнитное строение реализуется у конкретного образца с использованием одних только расчетов бывает затруднительно.

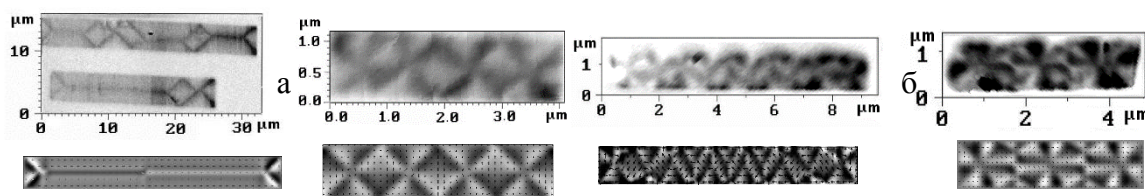


Рисунок 1. Экспериментальные и расчетные МСМ изображения микроструктур Fe (001), ориентированных вдоль ОЛН (а) и под углом 45° к ОЛН (б). Размеры структур: 4×24 мкм, 4×32 мкм и 1×4 мкм (а), а также 1×8 мкм и 1×4 мкм (б).

В нашей лаборатории был проведен цикл работ по изучению магнитного строения эпитаксиальных микро- и наноструктур Fe (001) и Fe (011) методом МСМ [1,2]. Для изготовления структур методом импульсного лазерного осаждения в сверхвысоком вакууме были эпитаксиально выращены пленки Fe (001) и Fe (011) на R- и A- плоскостях сапфира с подслоем Мо с одновременно улучшенными магнитными и электрон-транспортными свойствами. В частности, максимальное значение эффективной остаточной длины свободного пробега в пленках Fe (001) составило  $l_{\text{eff}}=540$  нм, что близко к рекордным значениям.

Для интерпретации МСМ контраста применялись микромагнитные расчеты с использованием программы OOMMF [3]. С использованием МСМ и расчета были установлены типы микромагнитных состояний, реализующихся в эпитаксиальных микро- и наноструктурах Fe (001) (Рис. 1) и Fe (011) (Рис. 3, 4) и их трансформация в зависимости от размеров и ориентации относительно легкой и трудной осей намагничивания.

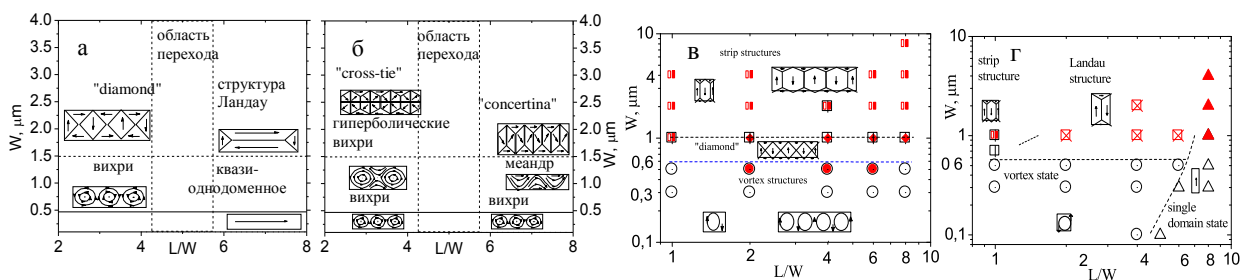


Рисунок 2. Диаграммы микромагнитных состояний для структур Fe (001) (а,б) и Fe (011) (в,г), ориентированных вдоль легкой (а,г) и трудной (б,в) осей намагничивания.

На основе выявленных закономерностей для прямоугольных микроструктур были построены диаграммы микромагнитных состояний (Рис. 2). Был интерпретирован МСМ контраст прямоугольных структур, ориентированных под углом к легкой оси и найдены микромагнитные состояния типа гиперболических вихрей, "гармошки" (Рис. 1б), "сороконожки" (Рис. 3 а,б). Эпитаксия обеспечила воспроизводимость всех найденных типов магнитного строения.

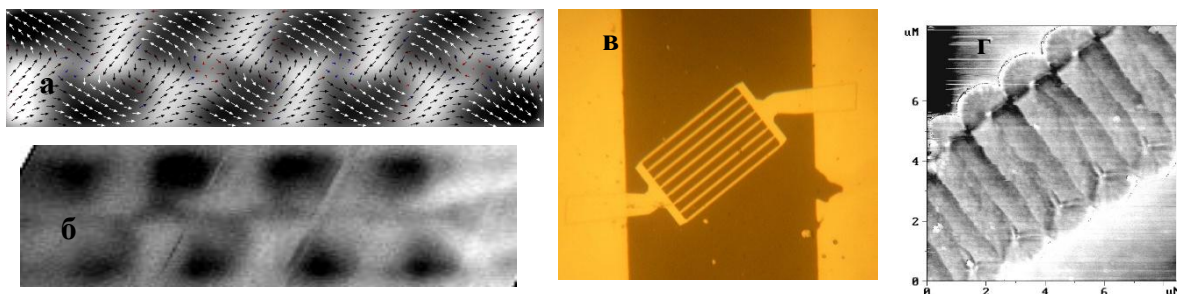


Рисунок 3. Расчетный (а) и экспериментальный (б) МСМ контрасты типа "сороконожка", у прямоугольных микроструктур Fe (011), ориентированных под углом  $35^\circ$  к легкой оси, а также общий вид (в) и МСМ изображение участка полоски Fe (011), "кружева".

Накопленный опыт позволяет предсказывать состояния для конкретных структур и проектировать их. Так были изготовлены наборы полосок с системой полуколец по бокам ("кружева", Рис. 3 в, г), в которых регулярно выстраиваются доменные стенки.

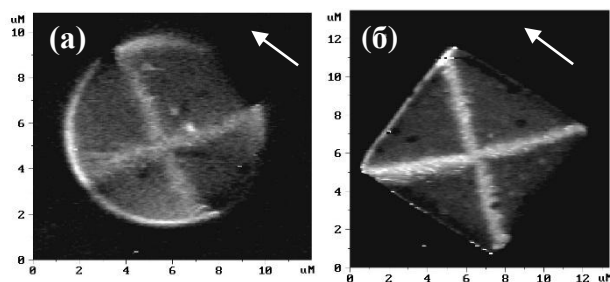


Рисунок 4. МСМ изображения микроструктур FeMn/Fe/Mo/R-sapphire

Были исследованы структуры из пленок антиферромагнетика на поверхности ферромагнетика, проявляющие эффект обменного сдвига. На Рисунке 4 показаны МСМ изображения микроструктур FeMn/Fe/Mo/R-sapphire. МСМ измерения показали, что ось обменной анизотропии направлена вдоль магнитного поля, приложенного при отжиге структур. Расчеты качественно подтвердили простую модель обменного сдвига.

1. L.A. Fomin, V.Yu. Vinnichenko, I.V. Malikov, G.M. Mikhailov, *J.Magn.Magn.Mater.* **330**, 6 (2013).
2. V.Yu. Vinnichenko, L.A. Fomin, I.V. Malikov, G.M. Mikhailov, *J.Magn.Magn.Mater.* **385**, 451 (2015).